



Analysis of the Relationship Between Landslide Susceptibility and the Intensity of Soil Erosion and Sediment Yield (Case Study: Darabkola Watershed, Mazandaran Province)

Samaneh Yosefi¹, Eisa Jokar Sarhangi^{2*} , Reza Esmaeili³ 

¹M.A. of Environment Hazards, Faculty of Humanities, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

² & ³Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Humanities, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 16 March 2025

Revised: 09 May 2025

Accepted: 18 May 2025

Available Online: 18 May 2025

Keywords:

Landslide Susceptibility

Sediment Yield Modeling

Erosion Assessment

Statistical Analysis (ANOVA)

Darabkola Watershed

ABSTRACT

Landslides are significant geomorphic hazards that contribute to both terrain instability and increased erosion and sediment production. In Iran, most studies have focused on landslide hazard zonation, with relatively little attention given to their role in sediment dynamics. This study aims to assess the relationship between landslide susceptibility and erosion intensity, as well as their effect on sediment yield in the Darabkola watershed, Mazandaran Province. A landslide susceptibility map was produced using the Frequency Ratio (FR) model, by integrating factors such as lithology, elevation, slope, aspect, land use, and distance from roads and streams. The model showed high predictive accuracy ($p = 0.99$). Erosion intensity was estimated using the MPSIAC and RUSLE models, with results validated by the BLM model and statistical indicators. The MPSIAC model, due to its higher accuracy, was used to quantify sediment yield across landslide susceptibility classes. ANOVA results revealed significant differences in sediment yield among classes, with the highest sediment production (61.35 tons/ha/year) observed in areas of very high landslide susceptibility. These findings highlight the importance of integrating landslide impacts into erosion and sediment yield models for improved prediction and effective watershed management.

*Corresponding author: Dr. Eisa Jokar Sarhangi

E-mail address: e.jokar@umz.ac.ir

How to cite this article: Yosefi, S., Jokar Sarhangi, E., & Esmaeili, R. (2025). Analysis of the Relationship Between Landslide Susceptibility and the Intensity of Soil Erosion and Sediment Yield (Case Study: Darabkola Watershed, Mazandaran Province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 245-265. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.92683.1560>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Two of the eight main soil degradation processes worldwide are soil erosion and landslides. Landslides, as environmental hazards, have significant negative impacts on ecosystems. In Iran, studies on landslides have primarily focused on hazard zonation, with limited attention given to their role in exacerbating erosion and increasing sediment yield in basins. Furthermore, most methods and models developed for assessing erosion and sediment yield do not account for the role of landslides. Additionally, studies evaluating the impact of landslides on sediment yield have often relied on data from hydrometric stations. However, not all material displaced by landslides is transported into the drainage network; some of it remains on slopes. Moreover, sediment measurement data is often unavailable for many basins.

The study area, the Darabkola watershed in Mazandaran Province, is highly susceptible to landslides due to its weak and tectonically active formations, as well as significant land-use changes. Therefore, landslide hazard zonation and its relationship with sediment yield are essential for better watershed management. The aim of this study is to evaluate the relationship between landslides and erosion intensity, as well as their impact on sediment yield in the Darabkola watershed.

Material and Methods

In this study, landslides in the Darabkola watershed were first investigated, and their frequency was determined by integrating factor maps including lithology, elevation, slope, aspect, land use, distance from roads, and distance from streams. For landslide zonation and determining the weight of influencing factors, the Area Density Model was used, and its evaluation was performed using the Empirical Probability (P) equation.

To determine the sediment yield from landslides, erosion class maps of the watershed were prepared using the MPSIAC and RUSLE models. The accuracy of these models was evaluated using the BLM model, which is based on field observations, as a reference map. A point layer with a regular grid was created for sampling at 1,204 points from the maps generated by these models. Based on these sampling points, statistical indices such as RMSE, MAE, MSE, and NSEC were calculated.

Following model evaluation, the landslide zonation map was overlaid with the sediment yield map, and the relevant data were extracted for analysis. The collected data were then analyzed using one-way ANOVA.

Results and Discussion

The results of overlaying the landslide distribution map with the factor maps indicate that conglomerate, marl, sandstone, and siltstone (Plcm), with a landslide area density of 0.634; slopes of 15–25% (0.127); southwest aspect (0.117); elevation of 150–300 meters (0.228); distance of 150–300 meters from streams (0.165); distance of 150–300 meters from roads (0.273); and rainfed agricultural land use (0.304) are associated with the highest landslide susceptibility.

After calculating the weight of each factor class influencing landslides, the weighted maps were combined, and a landslide susceptibility map was prepared using the Area Density Model. Its accuracy evaluation using the Empirical Probability equation confirmed the high accuracy of the zonation map ($p = 0.99$).

To determine the sediment yield related to landslides, erosion class maps were created using the MPSIAC and RUSLE models. The accuracy of these maps was assessed using the BLM model and the statistical indices mentioned. The results showed that the MPSIAC model had superior performance. Consequently, the sediment yield map derived from the MPSIAC model was overlaid with the landslide susceptibility map to estimate sediment yield for each susceptibility class.

The highest sediment yield in the Darabkola watershed was observed in the very high and high landslide susceptibility classes, with values of 61.35 and 53.42 tons/ha/year, respectively. To examine the significance of variations in sediment yield across different landslide susceptibility classes, one-way ANOVA was used. The results indicated a statistically significant relationship between sediment yield and

landslide susceptibility, confirming that erosion and sediment yield vary substantially across the landslide susceptibility classes.

Conclusion

In this study, landslide distribution in the Darabkola watershed was evaluated by integrating maps of lithology, elevation, slope, aspect, land use, and distances from roads and streams with existing landslide data. The Area Density Model was used to calculate the weighted values of each factor class, and the evaluation confirmed the high accuracy of the resulting landslide susceptibility map.

Subsequently, the erosion intensity map was produced using the MPSIAC and RUSLE models, and validated against the BLM model. Due to its higher accuracy, the MPSIAC model was used to assess sediment yield across landslide susceptibility classes. The ANOVA results confirmed that sediment yield increases significantly with landslide susceptibility, and areas with very high susceptibility exhibited the greatest sediment production.

The findings underscore the importance of integrating landslide impacts into erosion and sediment yield models. The significant contribution of high-susceptibility areas to sediment yield highlights the urgent need for targeted conservation strategies in the study area. It is also recommended that future sediment and erosion modeling efforts explicitly include landslide dynamics to improve prediction and watershed management outcomes.



تحلیل رابطه بین حساسیت زمین لغزش ها با شدت فرسایش و تولید رسوب (مطالعه موردی: حوضه دارابکلا، استان مازندران)

سمانه یوسفی^۱، عیسی جوکار سرهنگی^{۲*}، رضا اسماعیلی^۳

^۱کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران

^۲دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	زمین لغزش ها از مهم ترین مخاطرات ژئومورفولوژیک به شمار می روند که موجب ناپایداری زمین و افزایش فرسایش و تولید رسوب می شوند. در ایران، بیشتر پژوهش ها بر پهنه بندی خطر زمین لغزش تمرکز داشته و نقش آن ها در فرآیندهای رسوبی کمتر بررسی شده است. هدف این تحقیق، بررسی رابطه بین حساسیت زمین لغزش با شدت فرسایش و تأثیر آن بر رسوب دهی در حوضه دارابکلا (استان مازندران) است. نقشه حساسیت زمین لغزش با مدل نسبت فراوانی (FR) و با استفاده از لایه هایی مانند لیتولوژی، ارتفاع، شیب، جهت، کاربری اراضی و فاصله از جاده و آبراهه تهیه شد که دقت بالایی ($p = 0.99$) داشت. شدت فرسایش با مدل های MPSIAC و RUSLE برآورد و با مدل پایه BLM و شاخص های آماری اعتبارسنجی شد. مدل MPSIAC به دلیل دقت بیشتر، برای تخمین رسوب دهی در کلاس های مختلف حساسیت زمین لغزش به کار رفت. نتایج آزمون ANOVA تفاوت معنی دار بین کلاس ها را نشان داد و بیشترین رسوب (۶۱.۳۵ تن در هکتار در سال) در مناطق با حساسیت بسیار زیاد رخ داد. این نتایج بر لزوم در نظر گرفتن اثر مستقیم زمین لغزش ها در مدل های فرسایش و رسوب تأکید دارد.
کلمات کلیدی:	
حساسیت زمین لغزش	
مدلسازی تولید رسوب	
ارزیابی فرسایش	
تحلیل آماری (ANOVA)	
حوضه آبریز دارابکلا	

مقدمه

دو مورد از هشت فرآیند اصلی تخریب خاک که خاک‌های سراسر جهان با آن مواجه هستند، فرسایش خاک و زمین لغزش است. زمین لغزش یک تهدید بزرگ در برخی مناطق است که اغلب منجر به اثرات جدی بر جمعیت، اموال و زیرساخت‌ها می‌شود (Tavoularis, 2023). شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش و پهنه‌بندی خطر آن، گامی مهم در ارزیابی مخاطرات محیطی به شمار رفته و در مدیریت حوضه‌ها نقش انکار نشدنی دارد (Lonigro, Gentile & Polemio, 2015)؛ با این حال، اثرات زمین لغزش در فرسایش خاک و جابه‌جایی رسوبات، دست کم گرفته شده است. منشأ این رسوبات در مراحل قبل از گسیختگی دامنه‌ای، عمدتاً فرسایش آبی بوده و در هنگام گسیختگی نیز، وقوع زمین لغزش و جریان‌های واریزه‌ای است. این عوامل در کنار فرسایش آبی می‌توانند منشأ تولید رسوب در مرحله بعد از گسیختگی نیز به شمار روند (Peyrowan, Shariat Jafari & Lotfollahzadeh, 2017). مطالعه پدیده زمین لغزش در ایران بیشتر محدود به پهنه‌بندی و مطالعه خسارات جانی و مالی ناشی از آن بوده است و به نقش زمین لغزش‌ها در فرسایش خاک و افزایش بار رسوبی رودخانه‌ها توجه بسیار کمی شده است. هر چند شواهد دال بر این است که میزان رسوب وارده به رودخانه‌های مناطق کوهستانی بر اثر زمین لغزش‌ها قابل توجه است، اما از لحاظ کمی عدد و رقم متقن مبتنی بر تحقیق علمی برای آن ارائه نشده است (Talaee, Shariat Jafari & Beyrami, 2019). از سوی دیگر، در بیشتر مدل‌هایی که تاکنون برای ارزیابی فرسایش و رسوب حوضه‌ها ارائه شده‌اند (از جمله Fargas، CORINE¹ و FSM²)، نقش زمین لغزش دیده نشده است. در برخی از مدل‌ها (از قبیل EPM³، PSIAC⁴ و RUSLE⁵) برای اشکال فرسایش آبی از قبیل سطحی، شیری، آبکندی و یا رودخانه‌ای نقش مستقیم قائل شده‌اند، اما اثر زمین لغزش‌ها به طور مستقیم در نظر گرفته نمی‌شوند. از این رو، برآوردهای انجام شده در این مدل‌ها به ویژه در حوضه‌های رسوبی متاثر از زمین لغزش‌ها می‌تواند با واقعیت فاصله داشته باشد. با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات مختلفی در مورد زمین لغزش و فرسایش و رسوب ناشی از آن انجام شده است. در این راستا، شیرانی و مطهری‌نیا (Shirani & Motaharinia, 2016) به بررسی تأثیر زمین لغزش بر میزان تولید رسوب در پادانای سمیرم پرداختند که در آن، نمودارهای لغزش و میزان بارش، دبی و رسوب به روش رگرسیون خطی کل داده‌ها در دو ایستگاه شهید و سرباز به اثبات همبستگی مثبت میان سطح لغزش‌ها و رسوب موجود در حوضه منجر شده است. پیروان و همکاران (Peyrowan et al., 2017) در بررسی تأثیر زمین لغزش‌ها بر بار رسوبی رودخانه جاجرود و تحلیل داده‌ها در مقایسه با برآورد مدل نشان دادند که با افزایش درصد نسبی مساحت زمین لغزش‌ها از ۰/۷ به ۲/۴ درصد، حدود ۱۱/۵ درصد رسوب‌دهی حوضه بیشتر شده است. همچنین تحلیل داده‌ها در مقایسه با آمار مشاهده‌ای نشان داد که با افزایش درصد مساحت زمین لغزش، میزان تولید رسوب سالانه نیز افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر عسگری و همکاران (Asgari, Shadfar & Jafari, 2019) به معرفی مدل مناسب رابطه زمین لغزش با رسوب در سیستم حوضه آبخیز گل‌گل پرداختند. نتایج تحلیل کمی متغیرها نشان داد که بین شاخص‌های تأثیرگذار زمین لغزش بر بار رسوبی در این حوضه، ارتباط غیر خطی حاکم است و مساحت زمین لغزش با ضریب تبیین ۰/۸۷ بیشترین تأثیر را بر بار رسوبی در این حوضه دارد. طلایی و همکاران (Talaee et al., 2019) نیز با ارزیابی تأثیر زمین لغزش بر بار رسوبی حوضه بالخلوچای در استان اردبیل، میزان رسوب برآوردی در دوره‌های زمانی مختلف را با دوره‌های فعالیت زمین لغزش‌ها مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق بیانگر تأثیر زمین لغزش‌ها در افزایش فرسایش و رسوب‌دهی حوضه بوده و زمین لغزش‌های بزرگ باعث افزایش قابل توجه بار رسوبی رودخانه بالخلوچای شده‌اند. نصیری و همکاران (Nasiri, Mohammadzade, Lotfalian & Parsakhoo, 2022) نیز در پهنه‌بندی و مطالعه میدانی لغزش‌ها در اطراف جاده‌های جنگلی دارابکلا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به این نتیجه رسیدند که ۱۳/۲۶ درصد از مساحت منطقه در خطر لغزش

1- Coordinate Information on the Environment

2-Factorial Scoring Model

3- Erosion Potential Method

4- Pacific Southwest Inter-Agency Committee

5- Revised Universal Soil Loss Equation

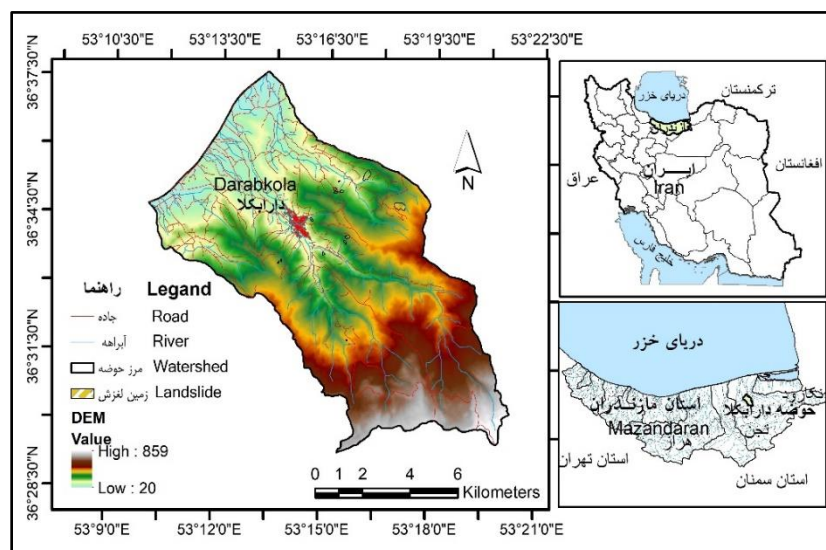
زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. فتحی گنجی (Fathi Ganji, 2023) در پژوهشی در حوضه کاکاشرف لرستان، نقش ویژگی‌های ژئومورفیک در حساسیت زمین به لغزش و تأثیر آن بر تولید رسوب را مورد بررسی قرار دادند. هم‌پوشانی نتایج مدل‌ها با داده‌های وقوع واقعی، عملکرد بالای مدل‌ها را نشان داد. در نمونه‌برداری میدانی و تحلیل سنج رسوب، نقش مستقیم زمین‌لغزش‌ها در افزایش بار رسوبی حوضه نیز به تأیید رسید.

پژوهش‌های خارجی نیز به بررسی ارتباط زمین‌لغزش و تولید رسوب پرداختند و یافته‌های مشابهی را گزارش کرده‌اند. یانگ و همکاران (Yang, Jan, Yen & Wang, 2019) در مطالعه حوضه رودخانه تسنگ ون^۱ در تایوان نشان دادند که توزیع زمین‌لغزش‌ها و ویژگی‌های لیتولوژیکی منطقه نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید رسوب دارند. آن‌ها دریافتند که بارش‌های شدید با افزایش رواناب و فرسایش شیب‌ها باعث تشدید انتقال رسوب در بازه‌های پایین‌دست می‌شود. این پژوهش اهمیت منابع رسوبی بالادست زمین‌لغزش‌ها را در تغذیه سامانه رودخانه‌ای و تغییر ظرفیت انتقال رسوب برجسته کرده است. کو و همکاران (Kou et al., 2020) در تحقیقی با تعیین مساحت و حجم ۵۴۲۰ رانش خاک کم‌عمق در بزرگ‌ترین دشت فلات لس چین، آن‌ها را با فرسایش پانزده حوضه آبخیز مقایسه کردند. نتایج مربوط به تغییرات مکانی فرسایش خاک نشان داد که به‌طور کلی فرسایش در شمال شدیدتر است و با توزیع زمین‌لغزش‌ها مطابقت دارد. این تجزیه و تحلیل نتیجه‌ای رضایت‌بخش از برازش خطی ($R^2 = 0.68$) بین مساحت زمین‌لغزش و فرسایش خاک را نشان داده است. کامپفورتس و همکاران (Campforts et al., 2020) در بررسی حوضه رود یارلنگ تسنگپو در هیمالیای شرقی به این نتیجه رسیدند که زمین‌لغزش‌ها حجم زیادی از رسوبات را تولید و به رودخانه‌ها منتقل می‌کنند. آن‌ها نشان دادند که می‌توان از مدل HyLands برای ارزیابی تأثیر فعالیت زمین‌لغزش‌ها بر ویژگی‌های جریانی و دامنه‌ها استفاده کرد. راموس شارون و همکاران (Ramos-Scharrón, Arima, Guidry, Ruffe & Vest, 2021) با بررسی زمین‌لغزش‌ها در پورتوریکو نشان دادند که زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی‌های شدید می‌توانند در مدت زمانی کوتاه، حجمی معادل چند سال رسوب تولید کنند. آن‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و تحلیل‌های فتوگرامتری تخمین زدند که بیش از ۲۳۰ هزار تن رسوب تنها در یک حوضه ۴۳ کیلومتر مربعی جابجا شده است. ژیه و همکاران (Xie, Coulthard & McLelland, 2022) با استفاده از مدل‌سازی عددی در حوضه رودخانه هونگه‌ی^۲ نشان دادند که موقعیت مکانی زمین‌لغزش‌ها تأثیر قابل توجهی بر الگوی انتقال رسوب و میزان رسوب خروجی از حوضه دارد. زمین‌لغزش‌های واقع در پایین‌دست به دلیل اتصال بیشتر به شبکه زهکشی، رسوب بیشتری تولید می‌کنند، در حالی که لغزش‌های بالادست باعث انباشت رسوب در شیب‌ها می‌شوند. بلاینه و همکاران (Belayneh et al., 2022) در حوضه دریاچه‌های آبا-چامو^۳ در اتیوپی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی، ۴۳۰ زمین‌لغزش و ۷۳۳۶ آبکند فعال را شناسایی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه بسیاری از زمین‌لغزش‌های بزرگ قدیمی و غیرفعال هستند، اما به‌طور غیرمستقیم با افزایش فرسایش آبکندی در محل لغزش‌ها، نقش مهمی در تولید رسوب ایفا می‌کنند. یان و همکاران (Yan et al., 2022) نیز به بررسی تأثیر ارتباط جانبی زمین‌لغزش‌ها بر تولید رسوب در فلات لسی پرداختند و برای این منظور شاخص جدیدی را معرفی کردند. نتایج نشان داد که لغزش‌های ناشی از بارش شدید تأثیر بلندمدت بر افزایش رسوب‌دهی در زنجیره شیب-آبراهه دارند و شاخص LCI ابزار مناسبی برای سنجش این ارتباط است. تاوولاریس (Tavoularis, 2023) با بررسی ارتباط بین فرسایش خاک و تخریب زمین در منطقه آتیکای یونان به این نتیجه رسید که یک همبستگی بسیار قوی بین فرسایش خاک و مناطق حساس به زمین‌لغزش وجود دارد. همچنین مدل حساسیت زمین‌لغزش می‌تواند به عنوان یک راهنما و مقدمه برای بررسی مسائل فرسایش خاک استفاده شود. با توجه به موارد فوق می‌توان روشی جایگزین برای شناسایی فرسایش خاک ارائه داد؛ به طوری که، نتایج تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در اعتبارسنجی مناطق فرسایشی می‌تواند به برآورد خطرات و آسیب‌پذیری فرسایش خاک کمک کند.

در بیشتر مطالعاتی که تاکنون به ارزیابی تأثیر زمین لغزش‌ها بر رسوب‌دهی حوضه‌ها پرداختند، از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده کرده و با تعیین رابطه داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب، حجم رسوب در ایستگاه‌های رسوب‌سنجی مرتبط با حوضه‌ها را برآورد کردند؛ این در حالی است که تمامی مواد جابه‌جا شده زمین لغزش‌ها، امکان انتقال به داخل شبکه زهکشی حوضه‌ها را ندارد؛ بلکه بخشی از آنها در سطح دامنه‌ها باقی می‌مانند. از طرفی، در بیشتر حوضه‌ها، اطلاعات رسوب اندازه‌گیری شده وجود ندارد و یا اینکه توزیع مکانی ایستگاه‌ها در خروجی حوضه‌های مورد نظر نیست و لغزش‌ها نیز در سراسر زیرحوضه‌ها و در بالادست و پایین‌دست ایستگاه‌ها نیز به وقوع می‌پیوندد. همچنین پایش فرسایش و رسوب، زمین لغزش‌ها و میزان جابه‌جایی مواد ناشی از آنها می‌تواند یک فعالیت پرهزینه، سخت و زمان‌بر باشد. منطقه مورد مطالعه یعنی حوضه دارابکلا در استان مازندران یکی از حوضه‌هایی است که حساسیت زیادی به زمین لغزش‌ها دارد؛ زیرا از سازندهای سست و تکتونیزه تشکیل شده است و تحت تأثیر تغییرات شدید کاربری اراضی نیز قرار دارد. در این منطقه به دلیل وجود سنگ بستر مارن و زهکشی نادرست جاده، لغزش‌های کم عمق متعددی با فواصل کمتر از ۲۰۰ متری حاشیه جاده ثبت شده است که به دلیل رها شدن جنگل و عدم اعمال مدیریت در حال توسعه و پیشرفت است (Nasiri et al., 2022). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش و ارتباط آن با تولید رسوب برای مدیریت بهتر حوضه نیز ضروری است. با توجه به موارد یادشده، هدف از این پژوهش، در ابتدا تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه دارابکلا و سپس انطباق آن با درجه رسوب‌دهی این حوضه بوده، و در نهایت تأثیر زمین لغزش‌ها در میزان رسوب‌دهی حوضه به کمک آزمون آماری مورد ارزیابی قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه دارابکلا با مساحت حدود ۱۰۸۶۸ هکتار در شرق استان مازندران و بین شهرهای ساری و نکا در جنوب جاده ترانزیتی ساری- گرگان قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی بین $53^{\circ}11'$ تا $53^{\circ}20'32''$ طول شرقی و $36^{\circ}29'08''$ تا $36^{\circ}37'28''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). از نظر ریخت‌شناسی این منطقه اساساً دارای توپوگرافی نسبتاً ملایمی است و چین‌های منطقه کم ارتفاع و کم شیب بوده و تحت تأثیر کوهزایی آلپی در ترشیاری و طی فاز کوهزایی پاساندین در اواخر پلیوسن- اوایل کواترنر بوجود آمده‌اند (ورقه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساری).



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Geographical Location Map of the Study Area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه دارابکلا با کمک تصاویر گوگل ارث، عملیات میدانی و ثبت موقعیت آن‌ها با کمک GPS تهیه شد. سپس برای تهیه لایه سازندهای زمین‌شناسی، از ورقه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ ساری، برای تهیه لایه‌های ارتفاع، شیب و جهت دامنه از مدل رقومی ارتفاع DEM سنجنده ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سایت USGS، برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره ای لندست ETM و جهت تهیه لایه‌های فاصله از جاده و آبراهه از تابع Distance استفاده گردید. همچنین برای استخراج داده‌های موردنیاز و تهیه ورودی‌های مدل‌های فرسایش و رسوب از گوگل ارث انجین استفاده شد. برای عامل فرساینده‌ی باران از ماهواره TerraClimate، برای عامل طول و درجه شیب از ماهواره MERIT Hydro، برای عامل مدیریت پوشش گیاهی از سنجنده‌های TM^۱، ETM+^۲ و OLI^۳ ماهواره لندست و برای عامل فرسایش‌پذیری خاک از گزارش منابع طبیعی استان مازندران استفاده شد.

در راستای اهداف پژوهش حاضر، ابتدا برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه مورد مطالعه با توجه به شرایط منطقه، متغیرها و عوامل اصلی موثر بر زمین‌لغزش شامل جنس سنگ، ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت دامنه، کاربری اراضی، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه مدنظر قرار گرفتند و برای تعیین وزن طبقات عوامل مؤثر از مدل تراکم سطح استفاده شده است. این مدل که امکان بررسی نقش عوامل محیطی مختلف در وقوع زمین‌لغزش‌ها را فراهم می‌کند؛ ابتدا توسط ون وستن و همکاران (Van Westen, Rengers, Terline & Soaters, 1997) بر اساس ارزیابی میزان تأثیر متغیرهای مستقل بنا نهاده شده است. در این پژوهش لایه‌های متغیرهای مستقل با لایه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در محیط ArcGIS همپوشانی شد و تراکم آن در هر طبقه از عوامل محاسبه گردید. مقادیر وزنی طبقات نیز با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد:

$$Warea = (A/B * 100) - (C/D * 100) \quad (1)$$

در رابطه بالا، Warea وزن تراکم سطح، A تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزش در هر طبقه، B تعداد پیکسل‌های هر طبقه، C کل پیکسل‌های زمین‌لغزش‌ها در منطقه و D کل پیکسل‌های منطقه می‌باشد. برای ارزیابی صحت نقشه نهایی پهنه‌بندی، به طور تصادفی از یک سوم از زمین‌لغزش‌های منطقه استفاده شده است؛ به این صورت که یک سوم از نقاط زمین‌لغزش که در فرایند تهیه نقشه و مدل‌سازی دخالت نداشتند را با نقشه پهنه‌بندی همپوشانی کرده و سطح لغزش در کلاس‌های مختلف حساسیت به دست آمد. سپس میزان دقت نقشه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$P = ks / s \quad (2)$$

که در آن p احتمال تجربی، ks تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزش در طبقه متوسط به بالا و s تعداد کل پیکسل‌های زمین‌لغزش منطقه است. در ارزیابی مدل‌ها، هر چه P به عدد یک نزدیک‌تر باشد، آن مدل صحت بیشتری دارد. همچنین در این پژوهش از شاخص AUC^۴ که مبتنی بر منحنی ROC^۵ است، نیز استفاده گردید. در این روش، با استفاده از مقادیر احتمال وقوع لغزش که از نقشه حساسیت به دست آمد و مقایسه آن با مکان واقعی زمین‌لغزش‌ها (نقاط ارزیابی)، منحنی ROC در نرم افزار SPSS ترسیم شده و سطح زیر منحنی AUC محاسبه شد. مقدار AUC بین ۰/۵ (عدم توانایی مدل) تا ۱ (دقت کامل) متغیر است.

در مرحله بعد، برای تعیین درجه رسوب‌دهی زمین‌لغزش‌ها، ابتدا نقشه طبقات فرسایش در حوضه با استفاده از مدل‌های MPSIAC^۶ و RUSLE تهیه شد. مدل PSIAC ابتدا توسط کمیته مدیریت آب امریکا برای محاسبه شدت فرسایش خاک و تولید رسوب بر اساس ۹ عامل زمین‌شناسی، خاک، آب و هوا، پوشش گیاهی، رواناب سطحی، پستی و بلندی، استفاده از زمین، وضعیت فرسایش سطحی و فرسایش رودخانه‌ای ارائه شد. سپس در سال ۱۹۸۲ در روش تعیین عامل‌های مذکور تغییراتی داده شد. در مدل

1- Thematic Mapper
2- Enhance Thematic Mapper
3- Operational Land Imager

4 - Area Under the Curve
5- Receiver Operating Characteristic
6- Modified PSIAC

MPSIAC برای هر یک از عوامل موثر، ضرایبی در نظر گرفته شد و معادلاتی جهت برآورد آنها پیشنهاد شده که برآورد کمی هر یک از عامل‌ها آسانتر و دقت مدل نیز افزایش یافته است. این مدل در حال حاضر مناسب‌ترین مدل مطالعه برای حوضه‌های آبخیز کشور شناخته شده است (Motamed Vaziri, Valeh & Ahmadi, 2023). در مدل RUSLE برای تعیین میزان فرسایش خاک حوضه، لایه‌های تولید شده شامل لایه‌های فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی به کمک افزونه Spatial Analyst برنامه ArcGIS در همدیگر ضرب شده و میزان هدررفت سالانه خاک (A) بر حسب تن در هکتار در سال بر اساس سلول به سلول به دست آمد.

برای ارزیابی میزان دقت مدل‌های مذکور از مدل BLM^1 که تمامی عوامل آن از طریق مشاهدات میدانی به دست می‌آید، به عنوان نقشه واقعیت زمینی استفاده شده است. این مدل‌ها، عوامل بیشتری را در ارزیابی فرسایش و رسوب از حوضه‌ها در نظر می‌گیرند و بیشترین کاربرد را در مطالعات و تحقیقات آبخیزداری دارند (Bayat, Arabkhedri, Behnam & Gerami, 2020). نقشه وضعیت فرسایش در شرایط فعلی بر اساس مدل BLM و جمع امتیاز فرسایش سطحی، لاشبرگ سطحی، پوشش سنگی سطح زمین، آثار تخریب در سطح زمین، فرسایش شیاری سطحی و آبکندی به دست آمد. یک لایه نقطه‌ای با شبکه‌بندی منظم به منظور نمونه‌برداری در ۱۲۰۴ نقطه از نقشه‌های حاصل از این مدل‌ها تهیه شد و بر اساس این نقاط نمونه‌برداری، میزان شاخص‌های آماری $RMSE^2$ (جذر میانگین مربعات خطا)، MAE^3 (میانگین خطای مطلق)، MSE^4 (میانگین مربعات خطا) و $NSEC^5$ (ضریب کارایی ناش و ساتکلیف) به دست آمد. آنگاه، با توجه به صحت بالای مدل‌های مورد استفاده، نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با نقشه درجه رسوب‌دهی حاصل از مدل MPSIAC در محیط ArcGIS همپوشانی شد. بر این اساس، برای هر یک از کلاس‌های حساسیت زمین لغزش، میانگین درجه رسوب‌دهی استخراج گردید. به منظور بررسی معنی‌داری آماری تفاوت بین این کلاس‌ها از نظر تولید رسوب، از آزمون آماری آنالیز واریانس یک طرفه ANOVA استفاده شده است. این آزمون وقتی انجام می‌شود که نمونه انتخاب شده از یک جمعیت توزیع نرمال داشته و در مسأله مطرح شده، چگونگی اختلاف چند گروه مستقل مقایسه شوند. آماره آزمون در این وضعیت به صورت رابطه (۳) است (Nobakht, 2016):

$$F = \frac{\sum_{i=1}^K n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 / K - 1}{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 / \sum_{i=1}^K n_i - K} \quad (3)$$

در این رابطه، k تعداد کل گروه‌ها یا جامعه‌های آماری مورد مقایسه و n تعداد مشاهدات است. همچنین، \bar{X}_i میانگین مشاهدات جامعه i ام و \bar{X} میانگین همه nk مشاهده صورت گرفته است. عبارت صورت کسر، نمایانگر واریانس بین گروهی (Between-group variance) است، که پراکندگی میانگین گروه‌ها نسبت به میانگین کلی را نشان می‌دهد. عبارت مخرج کسر، بیانگر واریانس درون گروهی^۶ است که پراکندگی مشاهدات درون هر گروه نسبت به میانگین همان گروه را نشان می‌دهد. از نسبت این دو واریانس، آماره F به دست می‌آید که در آزمون تحلیل واریانس برای بررسی معنی‌داری تفاوت میان میانگین گروه‌ها استفاده می‌شود. خلاصه محاسبه آماری آنالیز واریانس به صورت جدول ۱ ارائه شده است (Bihamta & Zare Chahoki, 2015). منابع تغییر شامل تیمار (متغیر گروه‌بندی) و خطای آزمایشی است. در ابتدا مجموع مربعات منابع تغییر مشخص می‌شود و سپس از تقسیم مجموع مربعات تیمار و خطا به درجه آزادی آنها، میانگین مربعات (واریانس) برای هر کدام به دست می‌آید. جهت محاسبه آماره F میانگین مربعات تیمار به میانگین مربعات خطا تقسیم می‌شود.

1- Bureau of Land Management

2- Root Mean Square Error

3- Mean Absolute Error

4- Mean Square Error

5- Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient

1-Within Group Variance

جدول ۱- آنالیز واریانس

Table 1- Analysis of Variance (Bihamta & Zare Chahouki, 2015)

آماره آزمون F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	
MSB	MSB	k-1	$n\sum_i(\bar{X}_i - \bar{X}_{..})^2$	بین گروه‌ها Between Groups
MSE		n-k	$\sum_i \sum_j (X_{ij} - \bar{X}_i)^2$	داخل گروه‌ها Within Groups
		n-1	$\sum_i \sum_j (X_{ij} - \bar{X}_{..})^2$	کل Total

نتایج و بحث

ارزیابی پراکنش زمین‌لغزش در حوضه دارابکلا

در این پژوهش ابتدا موقعیت زمین‌لغزش‌های موجود در حوضه ثبت شد که مجموع آنها شامل ۲۴۴ پیکسل می‌باشد. سپس وضعیت پراکنش این پیکسل‌ها در هر کدام از لایه‌های جنس سنگ، شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده مورد بررسی قرار گرفت و تراکم سطح طبقات نیز محاسبه شد. نتایج در جدول ۲ و شکل ۲ ارائه شده است. تقاطع لایه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه با لایه جنس سنگ نشان می‌دهد که کنگلومرا، مارن، ماسه سنگ و سیلتستون (Pl_{cm}) با تراکم سطح زمین‌لغزش ۰/۶۳۴، بیش‌ترین حساسیت را دارد. پس از آن مارن و ماسه سنگ با افق کنگلومرای دانه‌ریز (Pl_{ack}) با تراکم سطح ۰/۴۴۷ حساسیت بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج تقاطع لایه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه با سایر لایه‌ها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، طبقه شیب ۲۵-۱۵ درصد با تراکم سطح ۰/۱۲۷، بیش‌ترین میزان حساسیت زمین‌لغزش را نشان می‌دهد و بعد از آن، طبقه ۵-۱۵ درصد با رقم ۰/۰۳۴، در مرتبه بعدی قرار دارد. همچنین نتایج در ارتباط با جهت دامنه نشان می‌دهد که جهت‌های جنوب غرب و غرب به ترتیب با تراکم سطح ۰/۱۱۷ و ۰/۰۱۹ دارای زمین‌لغزش بیشتری هستند. طبقه ارتفاعی ۳۰۰-۱۵۰ متر با تراکم سطح ۰/۲۲۸ بیش‌ترین حساسیت را نشان داده است؛ در مقابل، در طبقات بالای ۴۵۰ متر، هیچ زمین‌لغزشی ثبت نشده است. نتایج بررسی فاصله از آبراهه نشان می‌دهد که طبقه فاصله ۳۰۰-۱۵۰ متر از آبراهه با تراکم سطح ۰/۱۶۵ بیش‌ترین حساسیت را دارند؛ اما در فاصله بالای ۶۰۰ متر از آبراهه‌ها هیچ زمین‌لغزشی ثبت نشده است. بررسی زمین‌لغزش‌های منطقه در ارتباط با فاصله از جاده نشان می‌دهد که طبقات ۳۰۰-۱۵۰ متر و ۰-۱۵۰ متر از جاده به ترتیب با تراکم سطح ۰/۲۷۳ و ۰/۰۰۱، دارای بیش‌ترین میزان حساسیت هستند. نتایج تقاطع لایه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه با لایه کاربری اراضی نیز نشان می‌دهد کاربری کشاورزی دیم با تراکم سطح ۰/۳۰۴، بیش‌ترین حساسیت زمین‌لغزش منطقه را دارند.

جدول ۲- تراکم سطح طبقات هر یک از عوامل موثر در زمین‌لغزش‌های حوضه دارابکلا

Table 2- Area Density of Classes for Each Factor Influencing Landslides in the Darabkola Watershed

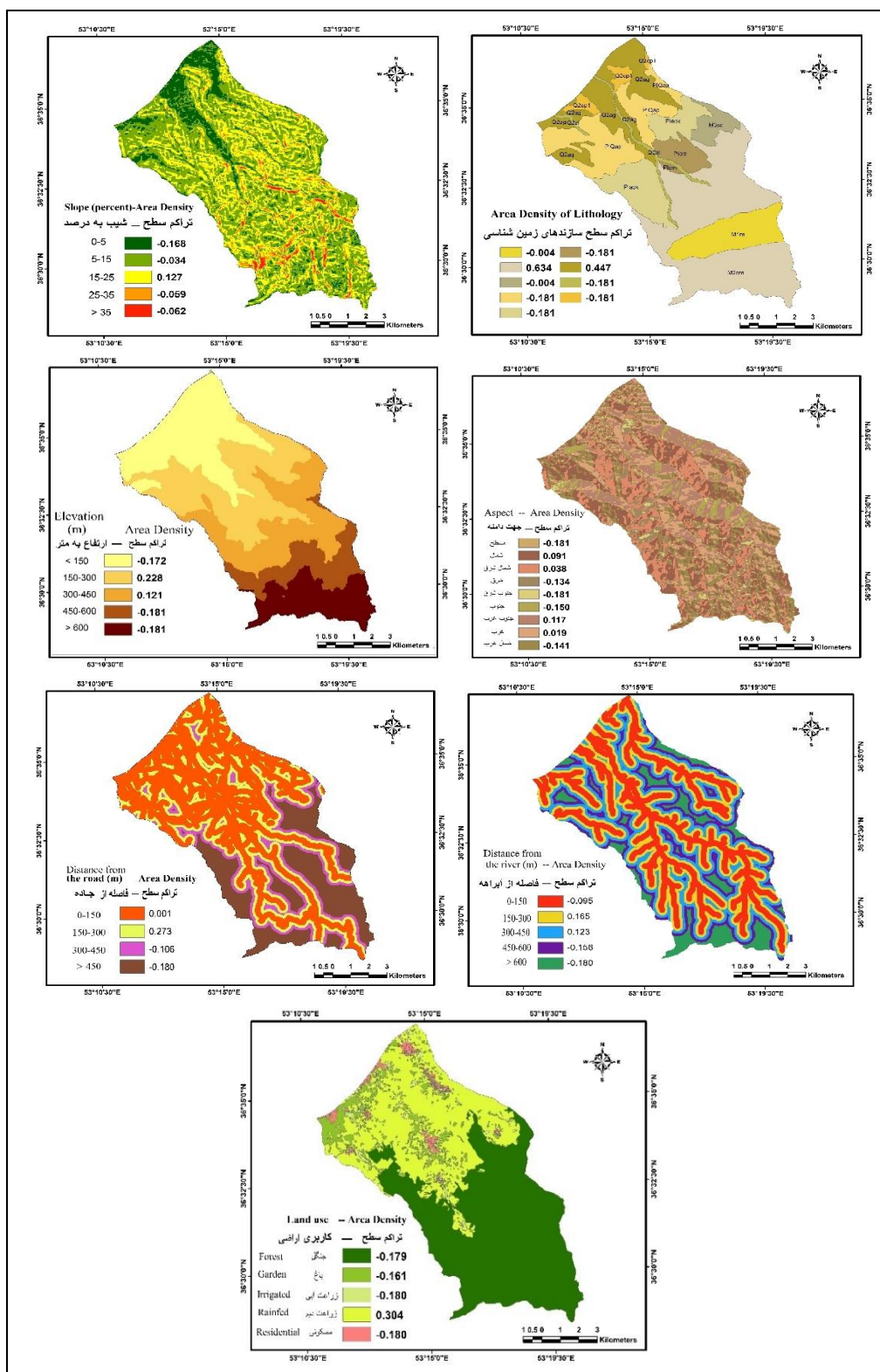
عوامل موثر Effective Factors	طبقه Class	تعداد پیکسل هر طبقه Number of Pixels in Each Class	تعداد پیکسل زمین‌لغزش Number of Landslide Pixels	تراکم سطح Area Density
جنس سنگ Lithology	M_3^{sc}	4520	8	-0.004
	Pl_{cm}	5520	45	0.634
	M_2^{sm}	50204	89	-0.004
	M_1^m	13620	0	-0.181

	Q_2^{ag}, Q_2^{cp1}	22116	0	-0.181
	Pl_{ack}	16253	102	0.447
	Q_2^{al}, Pl_{Qap}	22982	0	-0.181
	0-5	16062	2	-0.168
	5-15	66673	98	-0.034
شیب (درصد) Slope (percent)	15-25	43148	133	0.127
	25-35	7394	9	-0.059
	> 35	1687	2	-0.062
	Flate	396	0	-0.181
	N	30134	82	0.091
	NE	23294	51	0.038
	E	8512	4	-0.134
جهت دامنه Aspect	SE	2504	0	-0.181
	S	6593	2	-0.150
	SW	18152	54	0.117
	W	20538	41	0.019
	NW	24843	10	-0.141
	< 150	34268	3	-0.172
ارتفاع (متر) Elevation (m)	150-300	37202	152	0.228
	300-450	29490	89	0.121
	> 600	34004	0	-0.181
	0-150	44526	38	-0.095
فاصله از رودخانه (متر)	150-300	34696	120	0.165
	300-450	27019	82	0.123
Distance from the river (m)	450-600	16283	4	-0.156
	> 600	12691	0	-0.181
	0-150	66781	121	0.001
فاصله از جاده (متر) Distance from the road (m)	150-300	24897	113	0.273
	300-450	13350	10	-0.106
	> 450	30187	0	-0.181
کاربری اراضی Land use	جنگل Forest	70994	1	-0.179
	باغ Garden	10343	2	-0.161

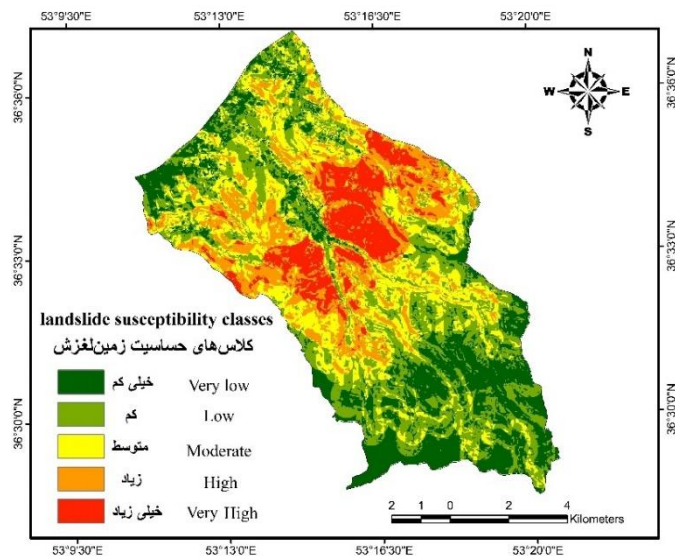
کشاورزی آبی	1485	0	-0.181
Irrigated Agriculture			
زراعت دیم	49734	241	0.304
Rainfed Agriculture			
مسکونی	2659	0	-0.181
Residential			

تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه داربکلا و ارزیابی دقت آن

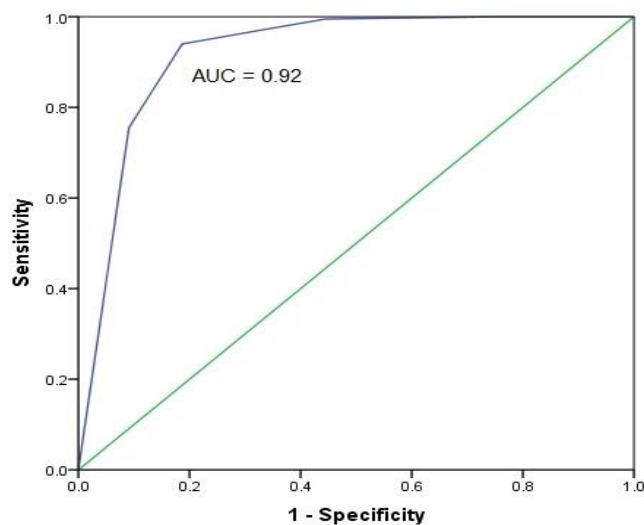
پس از محاسبه وزن هر طبقه از عوامل تأثیرگذار بر رخداد زمین لغزش‌ها در حوضه مورد مطالعه (جدول ۱)، نقشه‌های وزنی جنس سنگ، شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده ترکیب شده و نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل تراکم سطح تهیه شد. در مرحله بعد به منظور ارزیابی نتایج و مقایسه با شدت فرسایش و درجه رسوب‌دهی، نقشه مذکور با استفاده از روش شکست طبیعی^۱ به پنج کلاس حساسیت زمین لغزش طبقه بندی شده است (شکل ۳). نتایج نشان می‌دهد که ۲۱/۷ درصد از مساحت حوضه در کلاس حساسیت خیلی کم، ۲۸/۵ درصد حساسیت کم، ۲۳/۱ درصد حساسیت متوسط، ۱۶/۸ درصد حساسیت زیاد و ۹/۸ درصد از مساحت حوضه در کلاس حساسیت خیلی زیاد قرار دارد. از آنجا که در این پژوهش برای وزن‌دهی به لایه‌ها و تهیه نقشه حساسیت از داده‌های مکانی زمین لغزش استفاده شد، جهت ارزیابی دقت مدل تولید شده، در گام نخست از روش احتمال تجربی (p) به‌عنوان یکی از روش‌های معتبر کلاسیک استفاده شد. برای این منظور، یک‌سوم از زمین لغزش‌های منطقه که در تهیه نقشه حساسیت دخیل نبودند، به صورت تصادفی و با استفاده از ابزار Random Selection در محیط ArcGIS انتخاب شده و با نقشه حساسیت همپوشانی گردید. این انتخاب در چارچوب رویکرد اعتبارسنجی متقابل انجام گرفت تا از داده‌های مستقل برای ارزیابی مدل استفاده شود. مقدار P به‌دست‌آمده برابر با ۰/۹۹ بود که بیانگر دقت بالای مدل است. در این پژوهش علاوه بر روش احتمال تجربی (p)، از شاخص AUC نیز استفاده شده است. این شاخص مبتنی بر منحنی ROC بوده و دقت کلی مدل را در تفکیک صحیح نقاط دارای لغزش از نقاط فاقد لغزش نشان می‌دهد. در این مطالعه، منحنی ROC در محیط SPSS ترسیم شد (شکل ۴). مقدار به‌دست‌آمده برای AUC برابر با ۰/۹۲ بود که نشان‌دهنده دقت بسیار خوب مدل پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش حوضه داربکلا است.



شکل ۲- نقشه‌های تراکم سطح هر یک از عوامل موثر حوضه دارابکلا

Fig.2. Area Density Maps for Each Influencing Factor in the Darabkola Watershed

شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه دارابکلا

Fig.3. Landslide Susceptibility Zoning Map of the Darabkola Watershed

شکل ۴- منحنی ROC برای نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه دارابکلا

Fig.4. ROC Curve for the Landslide Susceptibility Zonation Map of the Darabkola Watershed

ارزیابی نقشه‌های طبقات فرسایش و درجه رسوب‌دهی حوضه دارابکلا

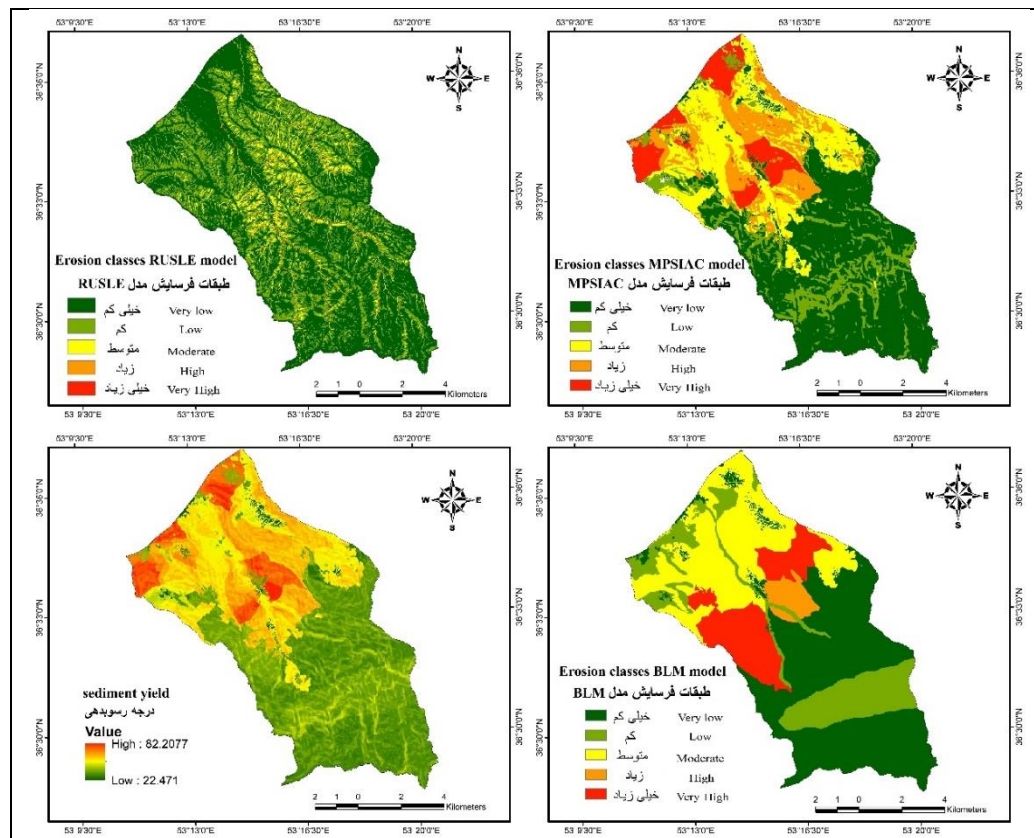
برای تعیین درجه رسوب‌دهی کلاس‌های زمین‌لغزش‌ها در حوضه دارابکلا، ابتدا نقشه پراکنش طبقات فرسایش منطقه با استفاده از مدل‌های MPSIAC و RUSLE تهیه شد و سپس با خروجی مدل BLM مقایسه گردید. مقادیر عوامل این مدل‌ها در جدول ۳ آمده است. از عوامل نه‌گانه مؤثر بر تولید رسوب در مدل MPSIAC، عوامل فرسایش سطحی و استفاده از زمین به ترتیب با ۹/۷۱ و ۶/۷۰ بالاترین مقدار را به خود اختصاص دادند. نتایج عوامل مدل RUSLE نیز نشان می‌دهد که فرسایش‌دهی باران، عامل اصلی مؤثر

در فرسایش خاک است که با رقم ۱۲۰/۴۵ بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است. نقشه‌های حاصل از اجرای مدل‌های مذکور در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که طبقات فرسایش خیلی کم و خیلی زیاد در مدل MPSIAC به ترتیب ۴۲/۸ و ۸/۶ درصد از مساحت کل حوضه را به خود اختصاص داده‌اند، اما مساحت این طبقات در مدل RUSLE به ترتیب ۵۸/۹ و ۰/۱۴ درصد از مساحت حوضه است که بیانگر تفاوت و تأثیر کاربرد لایه‌های متفاوت بین این مدل‌هاست. جهت ارزیابی درستی نقشه‌های طبقات فرسایش دو مدل مذکور، از مدل BLM که تمامی عوامل آن از طریق مشاهدات میدانی به دست می‌آیند؛ استفاده شده است. نتایج شاخص‌های آماری بر اساس نقشه نقاط نمونه‌برداری (۱۲۰۴ نقطه) نشان می‌دهد که مقادیر آماره‌های RMSE، MAE و MSE در مدل MPSIAC به ترتیب ۱/۲۳۵، ۰/۶۵۸ و ۱/۵۲۶ و در مدل RUSLE به ترتیب ۱/۵۱۴، ۱ و ۲/۲۹۳ به دست آمد که نشان می‌دهد آماره‌ها در مدل MPSIAC دارای مقادیر پایین‌تری بوده و در نتیجه این مدل، خطای کمتری دارد. همچنین مقدار آماره NSEC در مدل MPSIAC برابر ۰/۰۹۱ و در مدل RUSLE برابر ۰/۳۶۶- و منفی شده که بیانگر دقت کمتر این مدل است. بنابراین، با توجه با دقت بیشتر مدل MPSIAC، طبق روابط مربوط به این مدل، به لایه‌های عوامل مؤثر امتیاز داده شد. پس از ارزیابی عوامل مؤثر در فرسایش و تولید رسوب در منطقه، از جمع امتیاز آن‌ها درجه رسوب‌دهی حاصل شد (شکل ۵). همانطور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین و کم‌ترین درجه رسوب‌دهی در منطقه به ترتیب ۸۲/۲۱ و ۲۲/۴۷ می‌باشد که به معنی شدت فرسایش خیلی زیاد تا خیلی کم است.

جدول ۳- مقادیر میانگین عوامل مدل MPSIAC و RUSLE در سطح حوضه دارابکلا

Table 3- Mean Values of MPSIAC and RUSLE Model Factors at the Darabkola Watershed

مقدار Value	عوامل مدل Model factors	مدل Model	مقدار Value	عوامل مدل Model factors	مدل Model
120/45	فرسایش‌پذیری باران Rainfall Erosion	RUSLE	5/10	زمین‌شناسی سطحی Surface Geology	MPSIAC
0/29	فرسایش‌پذیری خاک Soil Erodibility		4/39	خاک Soil	
2/70	توپوگرافی طول شیب Topography(L)		5/63	آب‌وهوا Climate	
2/01	توپوگرافی درجه شیب Topography(S)		5/01	رواناب Runoff	
0/22	مدیریت پوشش گیاهی Vegetation		4/48	توپوگرافی Topography	
1/00	عملیات حفاظتی برای خاک Conservation		4/17	پوشش زمین Ground Cover	
30/62	میانگین فرسایش سالانه Average of annual loss		6/70	استفاده از زمین Land Use	
	(به تن در هکتار در سال)		9/71	فرسایش سطحی Surface Erosion	
	(Tons per hectare per year)		5/72	فرسایش رودخانه‌ای Channel Erosion	



شکل ۵- نقشه طبقات فرسایش با مدل MPSIAC (بالا راست)، مدل RUSLE (بالا چپ)، مدل BLM (پایین راست) و درجه رسوبدهی حوضه دارابکلا (پایین چپ)

Fig.5. Erosion Classes Maps Using the MPSIAC Model (Top Right), RUSLE Model (Top Left), BLM Model (Bottom Right), and Sediment Yield Rate of the Darabkola Watershed (Bottom Left)

بررسی ارتباط بین زمین لغزش ها با شدت فرسایش و رسوبدهی حوضه دارابکلا

به منظور بررسی ارتباط کمی بین زمین لغزش و رسوبدهی، نقشه حساسیت زمین لغزش که به پنج کلاس حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه بندی شده بود (شکل ۴) و نقشه عددی شدت فرسایش و درجه رسوبدهی حاصل از مدل MPSIAC (شکل ۵) در محیط Arc GIS به صورت Raster همپوشانی شدند. از ابزار Zonal Statistics as Table در بخش Spatial Analyst برای محاسبه میانگین مقادیر رسوبدهی در هر کلاس حساسیت زمین لغزش استفاده شد. این فرآیند منجر به تولید یک جدول عددی شد، که در آن میانگین و انحراف معیار درجه رسوبدهی در هر کلاس به تفکیک مشخص گردید (جدول ۴). این تحلیل زمینه را برای بررسی معنی داری آماری تفاوت ها از طریق آزمون ANOVA فراهم ساخت. بیشترین درجه رسوبدهی در منطقه مربوط به کلاس حساسیت زمین لغزش خیلی زیاد است که به رقم ۶۱/۳۵ می رسد و کمترین مقدار آن مربوط به کلاس خیلی کم است که به رقم ۴۳/۴۲ کاهش می یابد. به این ترتیب محدوده های با کلاس خیلی زیاد زمین لغزش در میزان فرسایش و تولید رسوب حوضه مورد مطالعه نقش بیشتری دارند (شکل ۶).

جدول ۴- میانگین درجه رسوب‌دهی هر یک از کلاس‌های حساسیت زمین لغزش در منطقه

Table 4- Average Sediment Yield Rate for Each Landslide Susceptibility Class in the Region			
انحراف معیار Standard Deviation	میانگین درجه رسوب‌دهی Mean Sediment Yield Rate	تعداد داده Number of Data	کلاس‌های زمین لغزش Landslide Classes
9.43	43.42	2346	خیلی کم Very low
10.32	46.19	3067	کم Low
11.18	49.73	2528	متوسط Moderate
9.81	53.43	1837	زیاد High
7.85	61.35	1050	خیلی زیاد Very high



شکل ۶- وقوع زمین لغزش‌ها در منطقه و بار رسوبی زیاد ناشی از آن‌ها

Fig.6. Landslide Occurrences in the Region and the Resulting High Sediment Yield

به منظور بررسی معنی‌داری تفاوت درجه رسوب‌دهی در کلاس‌های مختلف حساسیت زمین لغزش در منطقه با توجه به حجم نمونه‌ها (که بزرگ هست) از آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده گردید. نتایج به دست آمده از آزمون مذکور در جدول ۵ آمده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، نتایج در سطح ۰/۰۱ نشان می‌دهد درجه رسوب‌دهی کلاس‌های حساسیت زمین لغزش‌ها در منطقه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند.

در این راستا کو و همکاران (Kou et al., 2020) در منطقه تحقیق خود نشان داده‌اند که، بین شدت فرسایش خاک و توزیع رویدادهای زمین لغزش رابطه معنی‌داری وجود دارد. عسگری و همکاران (Asgari et al., 2019) و تاوولاریس (Tavoularis, 2023) نیز با بررسی ارتباط بین فرسایش خاک و تخریب زمین به این نتیجه رسیدند که یک همبستگی بسیار قوی بین فرسایش خاک و مناطق حساس به زمین لغزش وجود دارد.

جدول ۵- نتایج آزمون واریانس درجه رسوبدهی زمین لغزش‌ها

Table 5- ANOVA Test Results for Landslide Sediment Yield Rates

سطح معنی داری Sig.	آماره آزمون F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	
.000	729	73652	4	294610	بین گروه‌ها Between Groups
		100	10823	1092312	داخل گروه‌ها Within Groups
			10827	1386922	کل Total

به منظور بررسی دقیق‌تر و اینکه درجه رسوبدهی در کدام کلاس‌های حساسیت زمین لغزش، تفاوت معنی داری با یکدیگر دارند؛ از آزمون توکی استفاده گردید. نتایج بدست آمده در جدول ۶ نشان داده شده است که بر اساس آن درجه رسوبدهی در تمامی کلاس‌های حساسیت زمین لغزش، تفاوت معنی داری با یکدیگر دارند. همچنین، کلاس‌های زمین لغزش زیاد و خیلی زیاد با رقم ۵۳/۴۲ و ۶۱/۳۵ بیش‌ترین درجه رسوبدهی را به خود اختصاص دادند. بنابراین ضروری است، محدوده‌های با حساسیت زمین لغزش زیاد و خیلی زیاد به عنوان مراکز اصلی تولید رسوبات در برنامه‌ریزی‌های حفاظت آب و خاک مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

جدول ۶- زیرمجموعه‌های یکسان بر اساس آزمون توکی برای درجه رسوبدهی کلاس‌های حساسیت زمین لغزش

Table 6- Homogeneous Subsets Based on Tukey Test for Sediment Yield in Landslide Susceptibility Classes

درجه رسوبدهی Sediment Yield Rate					کلاس‌های زمین لغزش Landslide Classes
میانگین زیرمجموعه ۵	میانگین زیرمجموعه ۴	میانگین زیرمجموعه ۳	میانگین زیرمجموعه ۲	میانگین زیرمجموعه ۱	
				43.42	خیلی کم Very low
			46.19		کم Low
		49.73			متوسط Moderate
	53.43				زیاد High
61.35					خیلی زیاد Very high

نتیجه‌گیری

زمین لغزش‌ها می‌توانند منشأ اصلی رسوبات در بسیاری از حوضه‌ها به شمار رفته و از این رو، در ارزیابی میزان فرسایش و رسوب و همچنین مدیریت حوضه‌ها نقش انکار نشدنی دارند. در این پژوهش، ابتدا زمین لغزش‌های حوضه دارابکلا مورد بررسی قرار گرفت و نقشه پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از مدل تراکم سطح تهیه شد. ارزیابی صحت آن به کمک رابطه احتمال تجربی (P) نشان داد که نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده، صحت بالایی ($p=0.99$) دارد. همچنین، شاخص AUC که مبتنی بر ROC بوده، سطح دقت مدل را ۰/۹۲ و بسیار خوب نشان داد. نقشه حساسیت زمین لغزش حاکی از آن است که به ترتیب ۱۶/۸ و ۹/۸ درصد از مساحت حوضه در کلاس حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار دارد.

برای تعیین درجه رسوب‌دهی زمین لغزش‌ها، دو مدل MPSIAC و RUSLE اجرا شد و برای ارزیابی آنها از داده‌های مشاهده‌ای مدل پایه BLM و شاخص‌های آماری استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل MPSIAC نسبت به RUSLE دقت بالاتری در تعیین طبقات فرسایش خاک حوضه داشت؛ به‌طوری که مقدار آماره RMSE در مدل MPSIAC برابر ۱/۲۳۵ و در RUSLE معادل ۱/۵۱۴ به‌دست آمد. شاخص کارایی NSEC در مدل MPSIAC مثبت و برابر با ۰/۰۹۱ و در مدل RUSLE منفی و برابر با -۰/۳۶۶ بود. بر این اساس، نقشه درجه رسوب‌دهی حاصل از این مدل با نقشه حساسیت زمین لغزش حوضه همپوشانی شد و درجه رسوب‌دهی کلاس‌های حساسیت زمین لغزش‌ها به دست آمد. نتایج نشان داد که زمین لغزش‌ها نقش مؤثری در افزایش شدت فرسایش و تولید رسوب در حوضه دارابکلا دارند. کلاس "خیلی زیاد" زمین لغزش، با میانگین درجه رسوب‌دهی معادل ۶۱/۳۵ بیشترین نقش را در تولید رسوب دارد؛ در حالی که کلاس "خیلی کم" زمین لغزش با میانگین ۴۳/۴۲ کمترین مقدار را دارا می‌باشد. این اختلاف با استفاده از آزمون آماری ANOVA در سطح ۰/۰۱ ($p<0.01$) معنی‌دار تشخیص داده شد.

از آنجا که مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد زمین لغزش، به‌طور مستقیم با افزایش درجه رسوب‌دهی در ارتباط هستند؛ پیشنهاد می‌شود از نقشه‌های حساسیت زمین لغزش‌ها برای برآورد فرسایش و رسوب حوضه‌های مشابه استفاده شود؛ به‌طوری که استفاده از نقشه‌های حساسیت زمین لغزش به‌عنوان ورودی مدل‌های پیش‌بینی رسوب در حوضه‌های مشابه می‌تواند باعث افزایش دقت در برآورد رسوب سالانه گردد. همچنین با توجه به سهم بالای کلاس‌های حساسیت زیاد زمین لغزش‌ها در تولید رسوب، نیاز فوری به اجرای اقدامات مدیریتی و حفاظتی هدفمند در حوضه مورد مطالعه ضروری است. در این راستا پیشنهاد می‌شود، راهکارها بر اساس کلاس حساسیت زمین لغزش، میزان رسوب‌دهی و ویژگی‌های محیطی حوضه اجرایی شود. از جمله، مکان‌یابی و اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری بر اساس نقشه حساسیت زمین لغزش و نقشه درجه رسوب‌دهی؛ اصلاح شیب دامنه‌ها و پایدارسازی نقاط بحرانی با استفاده از دیواره‌های حائل و زهکشی؛ مدیریت کاربری اراضی به‌ویژه بازگرداندن کاربری‌های تخریب‌شده به حالت جنگلی یا مرتعی در بالادست حوضه؛ پوشش گیاهی حفاظتی با کاشت گونه‌های مقاوم در برابر لغزش مانند درختان عمیق‌ریشه و گونه‌های تثبیت‌کننده خاک می‌توانند در کنار توسعه مدل‌های فرسایشی که نقش مستقیم زمین لغزش را لحاظ می‌کنند، دقت پیش‌بینی و اثربخشی برنامه‌های حفاظت خاک را در حوضه‌های مشابه افزایش دهند.

References

- Asgari, S., Shadfar, S., & Jafari, M. (2019). Introduction of proper model of land slide relationship on sediment in GolGol basin system. *Environmental Erosion Research*, 9(2), 89-107. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1398.9.2.2.8>
- Bayat, R., Arabkhedri, M., Behnam, N., & Gerami, Z. (2020). Performance evaluation of EPM and MPSIAC Models for determination of Erosion Status of Shahriari Watershed. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7(3), 1-16. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.7.3.1>
- Belayneh, L., Dewitte, O., Gulie, G., Poesen, J., O'Hara, D., Kassaye, A., ... & Kervyn, M. (2022). Landslides and gullies interact as sources of lake sediments in a rifting context: Insights from a highly degraded mountain environment. *Geosciences*, 12(7), 274. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070274>
- Bihamta, M. R., & Zare Chahoki, M. A. (2015). *Principle of statistics for the natural resource's science*. Tehran: Tehran University Press. [In Persian]
- Campforts, B., Shobe, C. M., Steer, P., Vanmaercke, M., Lague, D., & Braun, J. (2020). HyLands 1.0: a hybrid landscape evolution model to simulate the impact of landslides and landslide-derived sediment on landscape evolution. *Geoscientific Model Development*, 13(9), 3863-3886. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3863-2020>
- Fathi Ganji, R. (2023). *Assessment of geomorphic factors influencing landslide susceptibility and its role in sediment production: A case study of the Kakasharaf Watershed, Lorestan Province*. (Master's thesis). University of Tehran, Tehran. [In Persian]
- Kou, P., Xu, Q., Yunus, A. P., Liu, J., Xu, Y., Wang, C., & Dong, X. (2020). Landslide-controlled soil erosion rate in the largest tableland on the Loess Plateau, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(9), 2478-2499. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1710812>
- Lonigro, T., Gentile, F., & Polemio, M. (2015). The influence of climate variability and land use variations on the occurrence of landslide events (Subappennino Dauno, Southern Italy). *Italian Journal of Engineering Geology & Environment*, 35, 192-195. <https://hdl.handle.net/11586/268816>
- Motamed Vaziri, B., Valeh, S., & Ahmadi, H. (2023). The Relationship between Erosion Intensity and Geologic Units using Two Models with Different Structures (Case Study: Akhtarabad Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 41-59. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.78329.1269>
- Nasiri, M., Mohammadzade, M., Lotfalian, M., & Parsakhoo, A. (2022). Zoning and Field Study of Landslides along Forest Roads of Darabkola-Sari. *Journal of Watershed Management Research*, 13(26), 105-114. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.105>
- Nobakht, M. B. (2016). *Advanced Research Method*. Academic Jihad Publishing Organization. [In Persian]
- Peyrowan, H., Shariat Jafari, M., & Lotfollahzadeh, D. (2017). Landslides effect on sediment load amount of Jajrood River. *Watershed Engineering and Management*, 9(2), 179-189. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109724>
- Ramos-Scharrón, C. E., Arima, E. Y., Guidry, A., Ruffe, D., & Vest, B. (2021). Sediment mobilization by Hurricane-driven shallow landsliding in a wet subtropical watershed. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(5), e2020JF006054. <https://doi.org/10.1029/2020JF006054>

- Shirani, K., & Motaharinia, A. (2016). Investigating the Effect of Landslide on Sediment Production (Case Study: Semirom Padna, Isfahan). Paper presented at the Proceedings of the First International Conference on Natural Hazards and Environmental Crises of Iran, Solutions and Challenges, Ardabil. [In Persian] <https://civilica.com/doc/549230/>
- Talaei, R., Shariat Jafarei, M., & Beyrami, B. (2019). Evaluation of landslides on sediment yield of Balekhlou-Cahy basin in Ardabil Province. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 193-210. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.118430>
- Tavoularis, N. (2023). Soil erosion and landslide susceptibility mapping in western Attica, Greece: A rock engineering system approach. *Geosciences*, 13(11), 338. <https://doi.org/10.3390/geosciences13110338>
- Van Westen, C. J., Rengers, N., Terline, M. T. J., & Soaters, R. (1997). Predication of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-Based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86(2), 404-414.
- Xie, J., Coulthard, T., & McLelland, S. (2022). Modelling the impact of seismic triggered landslide location on basin sediment yield, dynamics and connectivity. *Geomorphology*, 398, 108029. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108029>
- Yan, X., Jiao, J., Li, M., Qi, H., Liang, Y., Xu, Q., ... & Wang, H. (2022). Lateral sediment connectivity of landslides occurred under a heavy rainstorm and its influence on sediment yield of slope-channel cascade on the Loess Plateau. *Catena*, 216, 106378. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106378>
- Yang, S. Y., Jan, C. D., Yen, H., & Wang, J. S. (2019). Characterization of landslide distribution and sediment yield in the TsengWen River Watershed, Taiwan. *Catena*, 174, 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.011>